

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2021.04.001

用于水色卫星性能跟踪的西北太平洋自然目标 优选研究

李尉尉, 李铜基*, 朱建华, 韩 冰, 高 飞

(国家海洋技术中心, 天津 300112)

摘 要: 利用空间分布均匀、海洋与大气光学特性年际稳定性高的海洋区域作为自然基准场, 是开展水色卫星遥感器定标检验和长期辐射性能跟踪最为经济便捷的方式。本文以西北太平洋海域为例, 利用 2008—2018 年共计 11 年的 MODIS L3 级月平均数据, 从空间均匀度、季节变化性、年际稳定性上进行了场区更优化筛选, 优选区域更加均匀, 呈微弱的季节性变化和非常一致的年际变化, 适合全年开展定标检验和遥感器辐射性能跟踪工作。

关键词: 水色卫星; 西北太平洋; 自然目标; MODIS 数据

中图分类号: P733.3+1

文献标识码: A

文章编号: 1003-2029 (2021) 04-0001-07

卫星遥感器辐射定标是获取准确可靠的水色遥感数据的重要条件。定标是确定遥感仪器入瞳处的辐射量与其输出的数字量之间的转换关系^[1], 但随着遥感器在轨时间的延长, 其元器件存在老化及污染等情况, 辐射性能会发生变化, 为确保其量化产品的应用, 需要在卫星全寿命周期监测其辐射性能的变化^[2]。而这其中最经济可行的方案即是利用天然地物目标对其实施辐射性能跟踪^[3-4]。同时, 不同历史时期的卫星数据可组成长序列描述地球生物圈气候态的数据集 (CDR), 通过提供稳定的辐射基准——天然地物目标即是确保数据集生成的基础^[5]。为此, 寻找一系列空间分布均匀、海洋与大气光学特性年际稳定性高的海洋区域作为自然靶场, 开展水色卫星遥感器定标检验和长期辐射性能跟踪是非常必要的^[6-7]。

大洋中部环流形成的寡营养盐海区远离大陆,

水色三要素浓度很低且以叶绿素浓度为主导, 受陆源气溶胶影响小, 气溶胶类型较稳定, 水体环境变化幅度较小, 是天然的水体光学辐射基准场^[7]。

2002 年, FOUGNIE B 等利用一年的 SeaWiFS 数据产品识别了 15 个海洋场点, 并利用海洋和大气参数来表征场区特性^[8]。2010 年, FOUGNIE B 等利用 9 年 (1999—2007 年) 的 SeaWiFS 数据重新定义之前 15 个海洋场点的空间均匀性, 提出了新的 6 块区域^[8-9]。2012 年, 赵崴通过分析 1998—2007 年的 SeaWiFS 叶绿素、离水辐亮度和气溶胶产品数据, 选择了符合条件的 7 个海区, 作为开展大气瑞利散射 (Rayleigh Scattering) 定标研究的区域^[10]。2017 年, ZIBORDI G 等利用 1997—2010 年的 SeaWiFS 数据找出建立适用于海洋水色观测计划的潜在系统替代定标场区位置, 为 CDR 产品制作服务^[5]。2019 年, REVEL C 基于 FOUGNIE

收稿日期: 2020-11-05

作者简介: 李尉尉 (1985—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事海洋水色遥感研究。E-mail: 13821227862@163.com

通讯作者: 李铜基 (1969—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事海洋水色遥感研究。E-mail: rsresearch@163.com

B 筛选的 6 块区域来检查和提高 Sentinel 2A 和 2B 卫星绝对定标系数的准确性,开展了卫星绝对定标监测研究^[11]。

在 FOUGNIE B 等利用 1999—2007 年的 SeaWiFS 数据提出 6 块寡营养盐区域的基础上,本文利用 2008—2018 年的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 数据,将 6 块区域之一的西北太平洋海域作为示范研究区域,从空间均匀度、季节变化性、年际稳定性 3 个方面对该区域进行优选和分析研究,以更新该区域的光学特征信息,服务于我国海洋水色卫星的长期性能跟踪。

1 数据和方法

1.1 卫星数据

本文采用美国国家航空航天局 (NASA) 发射的 AQUA 卫星 MODIS 的 L3 级数据 (数据下载于 <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/l3/>)。L3 级标准产品包括各个波段的遥感反射率和叶绿素浓度等。MODIS 的 L3 级数据是在 L2 级数据基础上剔除了无效标识,进行 4 km 网格化再通过月平均得到的。本文使用了 2008—2018 年共计 11 年的 MODIS L3 级月平均数据,包括 412 nm、443 nm、488 nm、555 nm、667 nm 波段的遥感反射率 Rrs、叶绿素浓度 Chla 以及海表温度 SST。本文选用 Rrs 描述目标海域的光学特征,选用 Chla 表达目标海域光学特性的主要因素,选用 SST 分析目标海域光学特性及 Chla 季节变化的温度影响。

1.2 研究方法

本文从空间和时间两个方面,综合空间均匀度、季节变化性、年际稳定性 3 个指标开展寡营养盐海区的优选和分析工作,空间均匀度不仅可以有效避免原位数据与卫星数据因观测尺度差异引入的误差,还可以有效提高星地匹配的概率;季节变化度用以表征星地匹配时辐射基准的置信

度;年际稳定性用以表征靶场辐射基准的时效性。图 1 是本文的技术路线图。

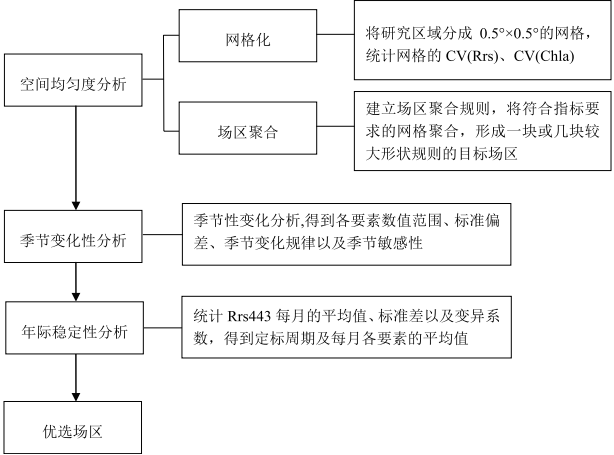


图 1 技术路线图

从空间均匀度上利用网格化分析和场区聚合规则对研究区域进行优选,对 11 年的 MODIS L3 级月平均数据分别进行网格化分析处理,以 0.5°×0.5°划分网格,计算各网格 Rrs 和 Chla 的变异系数 CV,即各网格 Rrs 或 Chla 的标准偏差与平均值的比值 (CV=SD/Mean),CV 是对区域空间异质性的定量描述。这种方法也是 FOUGNIE B^[8-9]、MOREL A^[7] 等所采用的方法。通过对研究区域 Rrs 数据的统计分析,同时遵循 Rrs443 10% 的典型空间变异准则^[8],建立了场区聚合的规则条件 (表 1),依据规则计算并分析各网格满足条件的情况,形成一块或几块较大形状规则的目标场区。

表 1 场区聚合的规则

指标	阈值
CV(Rrs412)	<10%
CV(Rrs443)	<10%
CV(Rrs488)	<10%
CV(Rrs555)	<15%
CV(Chla)	<20%

利用 11 年长时间序列数据,从季节变化性、年际稳定性对目标场区的 Rrs、Chla、SST 数据进行统计分析,得到该区域各要素的季节变化规律

及敏感性、年际定标周期及每个月的 Rrs、Chla 平均值,从而最终确定优选场区。

2 场区空间均匀度分析

本文研究区域为 $139.5^{\circ}\text{E}—165.6^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ}\text{N}—22.7^{\circ}\text{N}$, 属于西北太平洋副热带环流区,是海洋沙漠区,叶绿素常年较低,同时该区域又是涡旋和台风活动频繁区域,对全球碳循环、海洋渔业、海气相互作用以及气候变化都具有相当重要的影响^[12]。

对西北太平洋 (PacNW) 海区分别进行网格化处理,依据场区聚合规则,识别出空间均匀度更优的海区。按照 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 划分网格,将 PacNW 场区划分成 1 378 个网格,计算 132 个月每个网格范围的 Rrs412、Rrs443、Rrs488、Rrs555 以及

Chla 等要素的变异系数 CV。依据场区聚合指标,给出了 132 个月每个网格各要素符合评价条件的情况 (见图 2)。由图 2 可见,在塞班岛以西海域,各要素的 CV 值均较大,同时,场区南部海域的 CV 值同样偏大。经综合分析,进一步确定目标海区 PacNW_YX 范围 (如图中红色框所示),即 $148^{\circ}\text{E}—165.5^{\circ}\text{E}$, $13^{\circ}\text{N}—22.5^{\circ}\text{N}$ 。

图 3 给出了目标海区 PacNW_YX 在 132 个月的 Rrs412、Rrs443、Rrs488、Rrs555 以及 Chla 等各要素的 CV 分布情况。可看出, Rrs412、Rrs443、Rrs488 的 CV 在 10% 以内的区域达到 99% 以上, CV (Rrs555) 在 15% 以内的区域达到 96% 以上, CV (Chla) 在 20% 以内的区域达到 99% 以上,目标空间更加均匀。

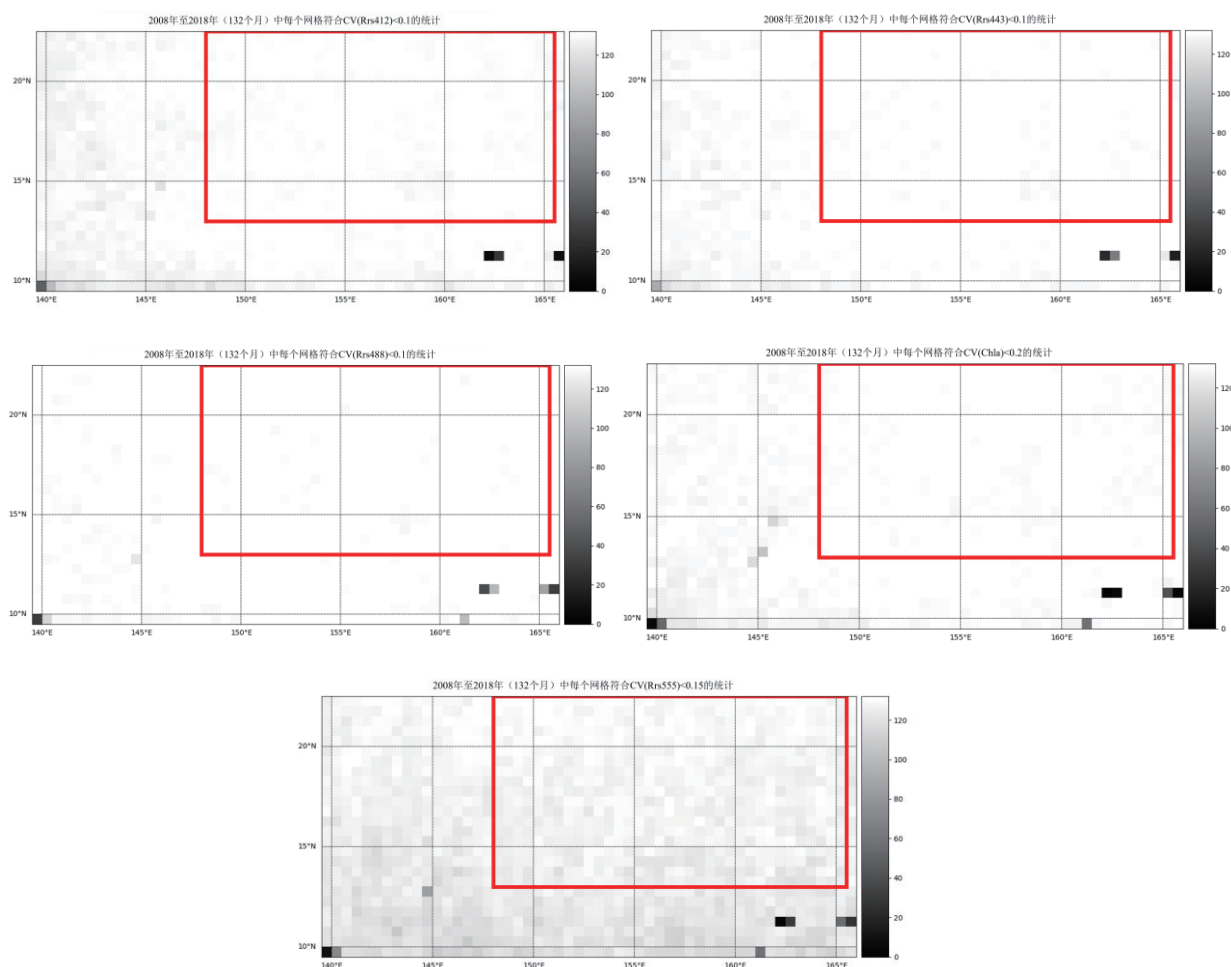


图 2 PacNW 场区各网格符合评价条件的情况,红框为目标海区

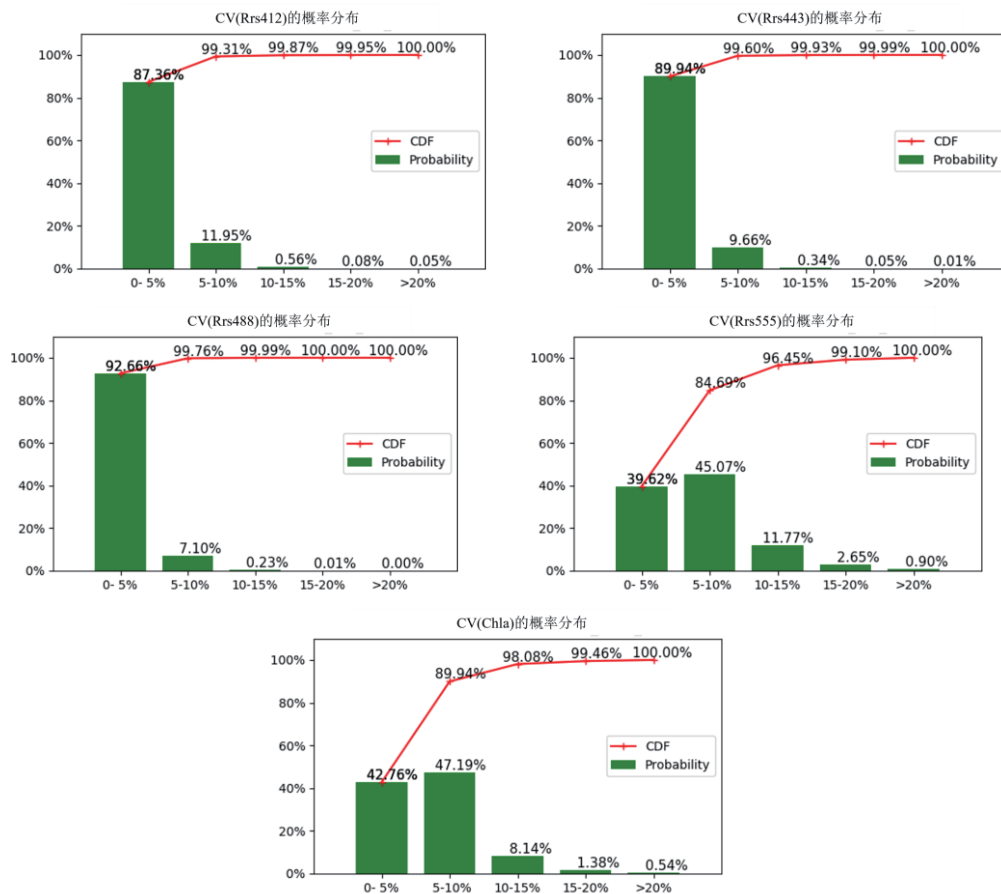


图 3 PacNW 目标海区各参数 CV 分布情况

3 场区季节变化性分析

由目标海区 PacNW_YX 的遥感反射率光谱图 (图 4) 可以看出, 该区域呈现典型的一类水体光谱特征, 从 400~700 nm 呈逐渐下降趋势, 至近红外波段其值趋近于零, 水体光学特征以叶绿素浓度为主导。

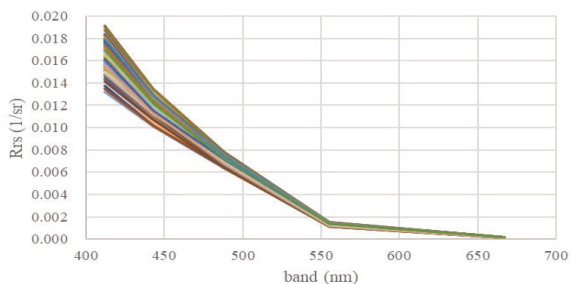


图 4 MODIS 卫星在 PacNW_YX 的遥感反射率光谱图 (2008 年 1 月至 2018 年 12 月)

图 5、图 6 分别给出了目标海区 PacNW_YX 的 Rrs412、Rrs443、Rrs488、Rrs555、Rrs667 以及 Chla

的长时间序列变化。11 年间其数值分别介于 0.013 2~0.019 2 sr^{-1} 、0.010 1~0.013 5 sr^{-1} 、0.006 3~0.007 8 sr^{-1} 、0.001 1~0.001 5 sr^{-1} 、0.000 1~0.000 2 sr^{-1} 、0.032 2~0.062 0 mg/m^3 之间, 标准偏差 σ 分别为 0.001 2 sr^{-1} 、0.000 7 sr^{-1} 、0.000 3 sr^{-1} 、0.84 $\times 10^{-4}$ sr^{-1} 、0.24 $\times 10^{-4}$ sr^{-1} 以及 0.005 7 mg/m^3 , 可以看出该场区呈现微弱的季节性变化, Rrs412、Rrs443、Rrs488 呈现出冬季较低、夏季较高的现象, 而 Chla 的变化正相反, 呈现出冬季较高、夏季较低的规律, 变化幅度小于 50%。Rrs555、Rrs667 数值相对更加稳定。

图 7 是目标海区 PacNW_YX 的 SST 的长时间序列变化, 可看出, 目标海区温度的每年最低值出现在 2—3 月份, 范围在 26~27 $^{\circ}\text{C}$ 之间, 最高值出现在每年的 7—9 月, 范围在 29.1~30.3 $^{\circ}\text{C}$ 之间。从整体看, 海表温度与叶绿素浓度呈负相关, 这是因为浮游植物主要生长在海洋的上层水体中, 而温

度是控制上层水体层化的主要因素^[6], 夏季海水温度升高, 限制营养盐的向上输送, 从而影响浮游植物的生长, 导致叶绿素值降低。

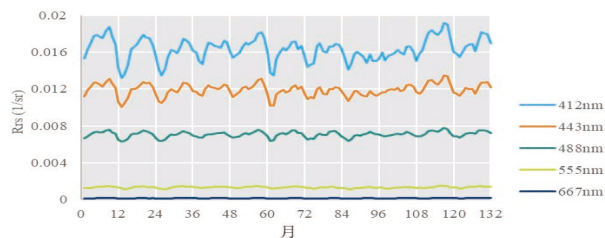


图5 2008—2018年MODIS卫星在目标海区各波段Rrs平均值月际变化

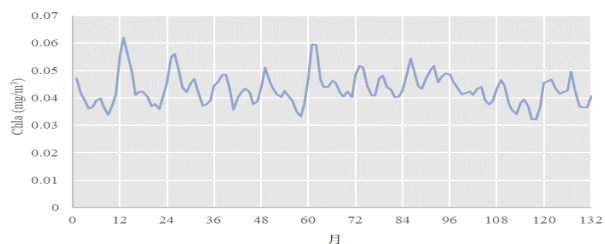


图6 2008—2018年MODIS卫星在目标海区Chla平均值月际变化

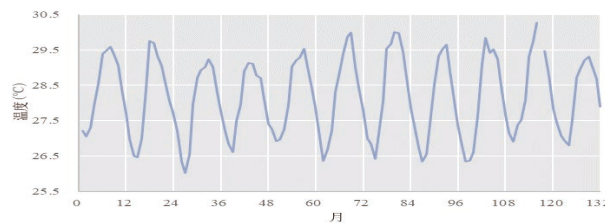


图7 2008—2018年MODIS卫星在目标海区SST平均值月际变化

4 场区年际稳定性分析

大洋一类水体以叶绿素为主导, 一类水体色素反演算法采用Rrs在443 nm与555 nm波段的比值来估算, 所以本文通过分析Rrs443年际波动来评估目标海区PacNW_YX的年际稳定性。图8给出了该海区在11年间每月的平均值及标准差, 1—12月的变异系数CV在0.031~0.053之间, 表现出非常一致的年际变化, 适合全年开展定标与遥感辐射性能跟踪工作。因此, 计算统计出该海区每个月波段遥感反射率和叶绿素浓度的平均值, 见表3。

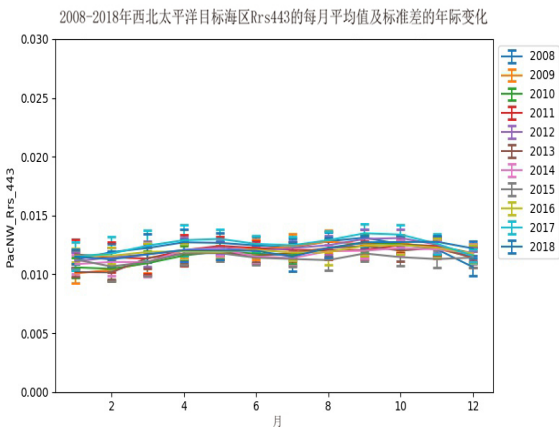


图8 2008—2018年MODIS卫星在目标海区的Rrs443年际变化

表3 目标海区PacNW各波段遥感反射率和叶绿素浓度数值统计

	Rrs412 (sr ⁻¹)	Rrs443 (sr ⁻¹)	Rrs488 (sr ⁻¹)	Rrs555 (sr ⁻¹)	Rrs667 (sr ⁻¹)	Chla (mg/m ³)
1月	0.015 0	0.011 0	0.006 7	0.001 28	0.000 14	0.050 8
2月	0.014 8	0.011 1	0.006 7	0.001 22	0.000 12	0.049 8
3月	0.015 5	0.011 5	0.006 8	0.001 21	0.000 12	0.044 9
4月	0.016 5	0.012 1	0.007 1	0.001 28	0.000 13	0.041 2
5月	0.016 8	0.012 2	0.007 2	0.001 34	0.000 15	0.040 4
6月	0.016 7	0.012 0	0.007 1	0.001 36	0.000 16	0.042 9
7月	0.016 6	0.011 9	0.007 2	0.001 38	0.000 17	0.044 2
8月	0.017 0	0.012 3	0.007 4	0.001 43	0.000 18	0.041 7
9月	0.017 4	0.012 6	0.007 5	0.001 42	0.000 18	0.038 5
10月	0.017 3	0.012 5	0.007 3	0.001 38	0.000 17	0.038 1
11月	0.016 9	0.012 3	0.007 2	0.001 36	0.000 17	0.039 9
12月	0.015 8	0.011 6	0.006 9	0.001 32	0.000 16	0.046 1

5 结 论

大洋中部环流形成的寡营养盐海区远离大陆,水色三要素浓度很低且以叶绿素浓度为主导,受陆源气溶胶影响小,气溶胶类型较稳定,水体环境变化幅度较小,是天然的水体光学辐射基准场,利用寡营养盐海区开展水色卫星遥感器定标检验和长期辐射性能跟踪是最为经济便捷的方式。本文以西北太平洋海区为例,利用2008—2018年共计11年的MODIS L3级月平均数据,从空间均匀度、季节变化性、年际稳定性上进行了场区更优化筛选,得到优选区域 148°E — 165.5°E , 13°N — 22.5°N 。该区

域各要素11年间变化幅度不大,呈微弱的季节性变化,其中Rrs呈现出冬季较低夏季较高的现象,Chla受SST影响,呈现冬季较高夏季较低的规律。同时,该区域表现出非常一致的年际变化,适合全年开展定标检验和遥感器辐射性能跟踪工作,文中给出了每个月Rrs和Chla的平均值。

利用自然地物作为光学辐射基准场具有经济便捷的优势,但需要长时序的跟踪和分析,以避免偶发因素的影响。本文的研究成果可服务于我国自主海洋水色卫星,将在后续研究中重点解决对我国HY1C、HY1D系列水色卫星的辐射性能跟踪问题。

参考文献:

- [1] 陈清莲,李铜基,任洪启. HY-1卫星水色扫描仪的辐射定标与真实性检验[J]. 海洋技术, 2003, 22(1): 1-9.
- [2] 韦玮. 基于全球定标场网的卫星遥感器长时间序列定标方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [3] VERMOTE E, SANTER R, DESCHAMPS P, et al. In-flight calibration of large field of view sensors at short wavelengths using Rayleigh scattering[J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13(18): 3409-3429.
- [4] ROBERT F. In-flight calibration of satellite Ocean-Colour sensors[R]. Canada: the International Ocean-Colour Coordinating Group, 2013: 54-60.
- [5] ZIBORDI G, MÉLIN F. An evaluation of marine regions relevant for ocean color system vicarious calibration[J]. Remote Sensing of Environment New York, 2017, 190: 122-163.
- [6] 梁顺林. 定量遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [7] MOREL A, CLAUSTRE H, GENTILI B. The most oligotrophic subtropical zones of the global ocean: similarities and differences in terms of chlorophyll and yellow substance[J]. Biogeosciences, 2010, 7(10): 3139-3151.
- [8] FOUGNIE B, HENRY P, ANDRÉ M, et al. Identification and characterization of stable homogeneous oceanic zones: climatology and impact on in-flight calibration of space sensor over rayleigh scattering[J]. Proceedings of Ocean Optics XVI, Santa Fe, New Mexico, 2002, 11: 18-22.
- [9] FOUGNIE B, JÉROME L, Gross-Colzy L, et al. Climatology of oceanic zones suitable for in-flight calibration of space sensors[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2010, 7807.
- [10] 赵崴. 基于自然目标的海洋水色卫星定标研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- [11] REVEL C, LONJOU V, SÉBASTIEN M, et al. Sentinel-2A and 2B absolute calibration monitoring[J]. European Journal of Remote Sensing, 2019, 52(1): 122-137.
- [12] 陈小燕. 基于遥感的长时间序列浮游植物的多尺度变化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

A Study of Selecting the Optimal North-West of Pacific Natural Target to Evaluate the Sea Color Satellite Performance

LI Weiwei, LI Tongji, ZHU Jianhua, HAN Bing, GAO Fei

National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China

Abstract: The ocean area with uniform spatial distribution and high inter-annual stability of oceanic and atmospheric optical properties is the most economical and convenient way to carry out calibration and validation of the sea color satellite remote sensor and long-term radiation performance tracking. In this paper, taking the North-West of Pacific as an example, the monthly average data of MODIS L3 from 2008 to 2018 (a total of 11 years) was used to conduct the field area optimization screening in terms of spatial uniformity, seasonal variation, and inter-annual stability. The optimal region is more evenly distributed, carrying very slight seasonal variations and highly consistent inter-annual differences, which is suitable for calibration and validation and for evaluating the performance of the remote sensor radiation throughout the year.

Keywords: sea color satellite; North-West of Pacific; natural target; MODIS data